



**GRUPO X
SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

**ESTUDOS PARA APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS DE ZNO
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DA CEMIG**

Luiz Carlos Leal Cherchiglia* Angélica da Costa Oliveira Rocha
Ana Cristina Guará Bezerra Vander José de Souza

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG

RESUMO

A CEMIG vem aplicando a tecnologia de pára-raios de ZnO em linhas de transmissão, utilizando-se de critérios rigorosos para escolha desses equipamentos, a partir de especificações técnicas oriundas de estudos fundamentados no estado da arte existente na literatura internacional. Com base nesses estudos já foram aplicados, em caráter experimental, pára-raios de ZnO em linhas de transmissão de 138 kV, 69 kV e 34,5 kV.

Este informe demonstra, através de simulações transitórias, a efetividade da aplicação dos pára-raios em LTs da CEMIG quanto ao seu comportamento diante de surtos atmosféricos. Com esse enfoque, são feitas considerações sobre a metodologia empregada no estudo, destacando-se os aspectos relevantes à modelagem dos transitórios com o programa ATP. Tomou-se como base, para essa análise, o estudo realizado para aplicação de pára-raios de ZnO ao longo de uma linha de transmissão de 69 kV com 60 % de suas estruturas sem cabos pára-raios.

PALAVRAS-CHAVE:

Linha de transmissão - Pára-raios - Sobretenção - Descarga atmosférica

1.0 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são as principais responsáveis pela maioria dos desligamentos não programados dos sistemas elétricos. As estatísticas internacionais atribuem a elas cerca de 65 % desses desligamentos em linhas de transmissão. O sistema de transmissão da CEMIG apresenta índices superiores aos internacionais, uma vez que está inserido no Estado

de Minas Gerais, onde a atividade cerâmica é muito severa em conjunto com altos valores de resistividades do solo, o que agrava sobremaneira a adversidade operacional da região ao bom desempenho das LTs.

Através de uma proteção adequada oferecida por cabos pára-raios e de um dimensionamento criterioso de aterramento dos suportes, quase sempre é possível reduzir a um número aceitável o número de desligamentos das linhas por descargas atmosféricas. Porém, em locais com problemas de adversidade operacional, somente a utilização de pára-raios de ZnO nas linhas possibilita a obtenção de bons desempenhos sob a ação de descargas atmosféricas.

Desta forma, a CEMIG iniciou, em 1993, pesquisas sobre o estado da arte da aplicação de pára-raios de ZnO em linhas de transmissão, visando a instalação desses dispositivos em linhas onde nenhum benefício adicional seria obtido através da implantação de soluções convencionais, já citadas. Atualmente, já se encontram instalados, de forma experimental, pára-raios em diversas de suas linhas de transmissão.

2.0 PÁRA-RAIOS DE ZNO EM LT'S

A aplicação de pára-raios em linhas de transmissão tem como objetivo principal a redução do número de desligamentos que ocorrem no sistema devidos a descargas atmosféricas. Esses equipamentos são instalados em LTs com desempenho insatisfatório, em paralelo com as cadeias de isoladores, impedindo que a suportabilidade das cadeias seja ultrapassada, quando da ocorrência de raios, que provocam o rompimento da isolação e conseqüente desligamento da linha.

Tentativas de se implantar esse tipo de solução não convencional foram feitas desde a década de 30, porém, os pára-raios existentes na época, ineficientes na eliminação das correntes de falta subsequentes de frequência industrial, inviabilizaram a utilização da nova técnica. A partir da década de 80, dois fatores tecnológicos importantes permitiram a rápida evolução dessa aplicação - o surgimento dos pára-raios de óxido de zinco que apresentam como característica uma alta não linearidade aliada a uma maior capacidade de absorção de energia e o encapsulamento polimérico cujo baixo peso facilita a instalação dos pára-raios nas torres. Atualmente, há registros de um número expressivo de pára-raios instalados em LTs em diversos países (Estados Unidos, Japão, México, etc.) com comprovada eficácia na redução dos desligamentos causados por descargas atmosféricas.

De uma maneira geral, os pára-raios de linha apresentam vantagens adicionais quando comparados com outros métodos de melhoria de desempenho. Dentre elas, podemos citar: flexibilidade; possibilitar nova concepção de projeto de LTs; possibilitar redução do nível das sobretensões de manobras ao longo da linha.

A definição do número de pára-raios a ser aplicado na linha de transmissão é função direta do nível de melhoria de desempenho que se deseja alcançar. Uma avaliação desse tipo pode ser realizada utilizando-se programas de transitórios eletromagnéticos e de desempenho que levam em conta não só as características construtivas da linha e resistividade do solo, assim como a atividade elétrica da atmosfera da região na qual a linha está inserida.

Com relação às características construtivas dos pára-raios de LTs, há duas concepções de projeto: pára-raios com e sem centelhadores externos em ar. A Tabela 1 faz uma comparação entre esses dois tipos, ressaltando as vantagens e desvantagens da utilização de cada um.

TABELA 1
COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
CONSTRUTIVAS DE PÁRA-RAIOS DE LTs

Pára-raios Sem Centelhador Externo	Pára-raios Com Centelhador Externo
Desligadores automáticos	Possível diminuição do custo (menor tensão nominal)
Repartição da energia envolvida com pára-raios adjacentes	Custo adicional de ferragens
Controla surtos de manobra ao longo da LT	Vida útil maior
possível redução vida útil	Influência das condições atmosféricas na coordenação gap-cadeia
Nível de proteção independe das condições atmosféricas	

3.0 APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS ZnO NAS LTs DA CEMIG

Já foram instalados cerca de 1500 pára-raios sem centelhadores em algumas linhas de transmissão da CEMIG de 34,5 a 138 kV, as quais estão sendo normalmente monitoradas com oscilógrafos, elos magnéticos, inspeções periódicas e controle em tempo real do número de descargas próximos às LTs, realizado através do Sistema de Localização de Tempestades - SLT. A seguir são descritas sucintamente as aplicações de pára-raios de ZnO nas LTs da CEMIG.

3.1 LT Diamantina - Gouveia - 34,5 kV

Essa LT está inserida numa região de alta resistividade do solo e a maioria de suas estruturas são de madeira, sem cabos pára-raios. Em Novembro de 1996, foram instalados pára-raios de ZnO em 50% do comprimento total da LT em todas as fases (417 unidades).

3.2 LT Ouro Preto - Mariana -138 kV (1)

Esta LT de circuito simples é construída com torres metálicas e um cabo pára-raios, tendo sido instalados 3 pára-raios por torre em toda a sua extensão em Novembro de 1998 (total de 324 unidades).

3.3 LT Ouro Preto - Ponte Nova - 138 kV

LT com torres metálicas, circuito simples e um cabo pára-raios, que apesar de possuir baixas resistências de aterramento possui um desempenho insatisfatório tendo em vista a alta incidência de descargas atmosféricas na região atravessada. Estudos realizados pela Universidade de São Paulo (1) mostraram que 2 pára-raios por estrutura nas fases inferiores seriam suficientes para reduzir o número anual de saídas por 100km para menos de 4,5. Os pára-raios (264 unidades) foram instalados em Fevereiro de 1998.

3.4 LT Itutinga - Minduri - 138 kV

Esta LT é também de circuito simples, torres metálicas e um cabo pára-raios, situada também em região de altos valores de densidade de descargas atmosféricas. Nessa LT foram instalados 132 pára-raios em Abril de 1998 (1 ou 2 pára-raios por torre dependendo das condições orográficas do terreno e da densidade de descarga para a terra no local).

3.5 LT Peti - Sabará - 69 kV

Essa linha não tem cabo pára-raios em metade da sua extensão e é construída com postes de madeira, onde devem ser instalados 3 pára-raios por estrutura em

Abril de 1999, perfazendo um total de 444 unidades (ver item 4).

3.6 LT Juiz de Fora - Santos Dumont - 138 kV

A partir da parceria da SEDIVER-ELECTROVIDRO com a CEMIG, foi possível a instalação de 10 pára-raios ZnO SEDIVER, com centelhador externo, na LT Juiz de Fora - Santos Dumont 138 kV (Out/97), para avaliar o desempenho operativo desses equipamentos. A LT Juiz de Fora - Santos Dumont é uma linha de circuito simples, torres metálicas e um cabo pára-raios. Nesse caso, a instalação não visa a melhoria do desempenho da LT mas o monitoramento da performance dos próprios pára-raios cujo desempenho está sendo acompanhado pelo uso de contadores de descarga, elos magnéticos (instalados em pontos críticos nos montantes e cabos pára-raios), oscilógrafos e o Sistema de Localização de Tempestades - SLT (3).

3.7 Desempenho das LTs com pára-raios de ZnO

A Tabela 2 resume o desempenho das LTs em questão frente as descargas atmosféricas, antes e após a instalação dos pára-raios.

TABELA 2
MELHORIA DO DESEMPENHO DAS LTs

LT	Deslig/100 km /ano	
	Antes	Depois
Diamantina - Gouveia	62	24
Ouro Preto - Mariana	40	0
Ouro Preto - Ponte Nova	20	4,5
Itutinga - Minduri	19	4,3
Petí - Sabará	40	-

4.0 ESTUDO DA APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS NA LT PETI-SABARÁ 69KV COM O PROGRAMA ATP

O desempenho insatisfatório observado na LT Peti-Sabará tem como consequência direta a degradação da qualidade do fornecimento de energia elétrica, resultando em constantes reclamações e questionamentos por parte dos consumidores supridos pela linha.

Dentre as alternativas possíveis para se obter uma melhoria no atendimento, a aplicação de pára-raios ZnO na linha se mostrou como a de implantação mais rápida, além de atuar na causa principal dos desligamentos ao minimizar os efeitos provocados pelas descargas atmosféricas.

Nesse item é apresentada a análise realizada com o ATP para a determinação da capacidade mínima de

absorção de energia desses pára-raios e dessa forma subsidiar a especificação desses equipamentos para a instalação em toda a LT e suas derivações.

Não foi necessário, para o caso específico da aplicação de pára-raios nessa LT, realizar uma avaliação para determinar o número ótimo desses equipamentos a serem instalados. A experiência resultante de estudos já feitos mostram que em linhas com trechos sem cabo pára-raios, elevadas resistências de pé de torre e em regiões de alta densidade de descarga, como é o caso, só haverá ganho significativo no seu desempenho caso sejam instalados pára-raios nas três fases de todas as estruturas.

4.1 Compilação dos dados.

4.1.1 Característica da linha

A LT Peti-Sabará possui ao todo 98 estruturas com cabo pára-raios e 148 estruturas sem cabo pára-raios, que representam 60% do total da linha. A maior parte das estruturas são de madeira com cabo de descida.

4.1.2 Resistência de aterramento

Considerou-se o valor de 300Ω como típico de resistência para todas as estruturas, com base na análise da distribuição dessas resistências ao longo da LT.

Com o objetivo de se obter uma sensibilidade dos resultados de energia com a resistência, utilizou-se, também, os valores de 30Ω , 150Ω , 2000Ω em todas as estruturas consideradas e 2000Ω na estrutura próxima à queda do raio e 300Ω nas demais.

4.1.3 Curva VxI dos pára-raios

A curva VxI dos pára-raios utilizada foi a do pára-raios de um determinado fabricante, referida à tensão de 57kV MCOV, 72kV tensão nominal.

Escolheu-se esse "rating" para os pára-raios levando-se em conta o valor padronizado pela CEMIG para pára-raios ZnO em subestação de 69kV e a tensão máxima nas fases sãs quando de ocorrência de curto-circuito fase-terra na linha (1.18 pu segundo simulações de curto-circuito).

4.1.4 Capacidade de absorção de energia.

Foram adotados para capacidade de absorção de energia valores de referência de 125kJ (2.2kJ/ MCOV) e 171kJ (3kJ/MCOV) fornecidos por dois fabricantes.

4.1.5 Amplitude e forma de onda descarga

Os estudos foram realizados adotando-se para amplitude da corrente de descarga principal (primeiro stroke) valores a partir de 40kA e forma de onda 2,6/62 μ s. Esses são valores médios levantados a partir de medições realizadas pela CEMIG na Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo (3).

Para a determinação do efeito das descargas subsequentes a ser considerado nesse estudo, foram realizadas análise estatísticas dos resultados obtidos na Estação de Pesquisas, concluindo ser satisfatório, no caso de estudos de capacidade térmica dos pára-raios, considerar apenas uma descarga subsequente com amplitude de 30% do valor da descarga principal à ela associada. A forma de onda adotada foi de 2.6/19 μ s.

4.2 Metodologia e análise dos resultados

Os estudos de simulação realizados tiveram como objetivo principal identificar, para o caso padrão (resistência de pé de torre 300 Ω), as amplitudes da corrente de descarga, incluindo as subsequentes, a partir das quais as capacidades de absorção de energia utilizadas como referência seriam excedidas, podendo causar, como consequência, falha dos pára-raios.

A probabilidade de ocorrência dessas correntes, em conjunto com a determinação do número de descargas que atingem a LT, permite que se defina o número esperado de pára-raios danificados no ano. Essa definição é de extrema importância para a análise custo / benefício da aplicação desses equipamentos na linha.

Realizou-se simulações específicas para os trechos com e sem cabos pára-raios, que são discutidas a seguir.

4.2.1 Trecho sem cabo pára-raios:

Para esse trecho estudou-se dois casos: no primeiro foi considerada a queda da descarga no condutor fase B, próxima a uma determinada torre (torre zero) e no segundo caso foi considerada a queda da descarga no topo da torre. Não foi avaliada a queda da descarga no meio do vão por não ser essa a condição mais crítica sob o ponto de vista da solicitação imposta ao pára-raios.

As Tabelas de 3 a 7 são relativas ao 1º caso ou seja, queda no condutor fase B torre zero e apresentam uma sensibilidade dos valores de energia nos pára-raios com as resistências de pé de torre para uma mesma corrente de descarga igual a 40kA, 2,6/62 μ s. Analisou-se as energias dos pára-raios instalados nas três fases da torre zero e em três torres a partir dela (torres 1,2,3).

TABELA 3 - RESISTÊNCIA 30 Ω

TORRE	ENERGIA MÁXIMA (kJ)		
	$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C$
0	2.77	101	2.77
1	0.22	67	0.22
2	0.327	52	0.327
3	0.188	45	0.188

TABELA 4 - RESISTÊNCIA 150 Ω

TORRE	ENERGIA MÁXIMA (kJ)		
	$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C$
0	15.4	91.0	15.4
1	0.98	56.0	0.98
2	1.80	52.4	1.80
3	2.90	49.0	2.90

TABELA 5 - RESISTÊNCIA 300 Ω

TORRE	ENERGIA MÁXIMA (kJ)		
	$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C$
0	21.7	95	21.7
1	1.85	51.6	1.85
2	2.67	48.8	2.67
3	4.61	48.5	4.61

TABELA 6 - RESISTÊNCIA 2000 Ω

TORRE	ENERGIA MÁXIMA (kJ)		
	$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C$
0	53	128	53
1	6.59	34.7	6.59
2	6.06	33.4	6.06
3	5.96	32.2	5.96

TABELA 7 - RESISTÊNCIA 2000 / 300 Ω

TORRE	ENERGIA MÁXIMA (kJ)		
	$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C$
0	28	65	28
1	2.25	56	2.25
2	3.25	53	3.25
3	5.7	52.6	5.7

Algumas considerações podem ser feitas a partir da análise dos resultados encontrados :

Para resistências mais baixas de pé de torre (inferiores a 30 Ω), as energias tendem a ser maiores. Esse fato se explica por ocorrer uma elevação das amplitudes das correntes nos pára-raios devido às baixas resistências, aproximando-se mais de uma condição de curto.

A partir de um determinado valor de resistência, nesse estudo em particular em torno de 150 Ω , as energias apresentam comportamento inverso e começam a se elevar com o valor da resistência sem, contudo, ocorrer uma elevação significativa na amplitude da corrente nos pára-raios. Isso se verifica devido a um decaimento

mais lento da corrente nos pára-raios, fazendo com que a energia, proporcional à área sob a curva corrente x tempo, se eleve. Com o aumento das resistências há, portanto, um menor efeito das possíveis reflexões negativas provenientes das torres vizinhas. Ao se comparar as Figuras 2 e 3 verifica-se essa tendência.

O pára-raios da fase B torre 0, próxima à queda do raio, apresentou a maior dissipação de energia nos casos com resistências iguais em todas as estruturas.

Para o caso com resistência superior na torre 0 (2000Ω) e inferiores nas demais (300Ω), há uma melhor divisão da energia com os pára-raios da mesma fase das torres vizinhas, devido à uma maior divisão das correntes entre eles.

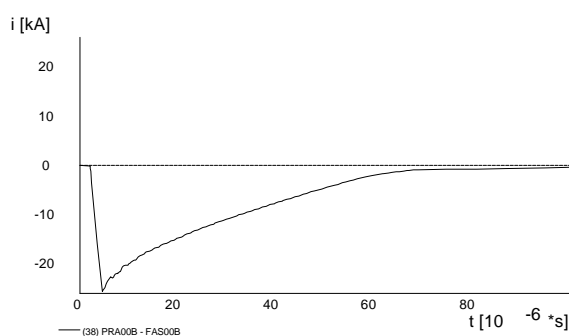


FIGURA 1 CORRENTE DOS PÁRA-RAIOS FASE B - RESISTÊNCIA 300 Ω

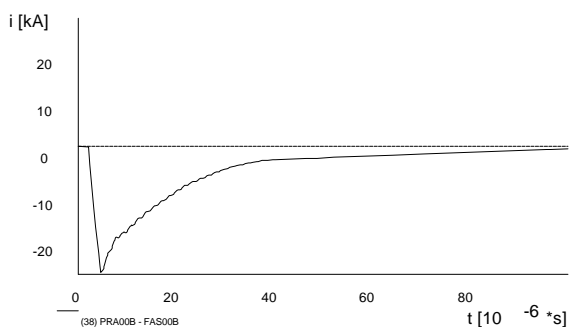


FIGURA 2 CORRENTE DOS PÁRA-RAIOS FASE B - RESISTÊNCIA 2000 Ω

As Tabelas 8 a 10 apresentam os resultados de energia relativos à queda da descarga de 40kA, 2,6/62 μ s no topo da torre, que correspondem ao 2º caso estudado.

TABELA 8 - RESISTÊNCIA 30 Ω

TORRE	ENERGIA MÁXIMA (kJ)		
	ØA	ØB	ØC
0	68	64	67
1	10.3	9.2	9.8
2	8.11	7.8	8.0
3	7.7	7.4	7.6

TABELA 9 - RESISTÊNCIA 300 Ω

TORRE	ENERGIA MÁXIMA (kJ)		
	ØA	ØB	ØC
0	131	120	129
1	14	13	13.4
2	13.7	12.7	13.6
3	13.6	12.4	13.5

TABELA 10 - RESISTÊNCIA 2000 Ω

TORRE	ENERGIA MÁXIMA (kJ)		
	ØA	ØB	ØC
0	145	133	145
1	4.96	4.1	4.95
2	5	4.9	5
3	4.8	4.5	4.7

Ao se comparar esses resultados com os relativos à queda do raio no condutor, observa-se que os valores de energia são mais elevados e aproximadamente iguais para os pára-raios nas três fases. Observa-se, também, uma diminuição nos valores de energia com a resistência, função da queda esperada dos valores da tensão de topo da torre. O decaimento da tensão também é mais lento para valores maiores de resistência.

A Tabela 11 apresenta as amplitudes das correntes de descargas, sem considerar as subsequentes, que deverão atingir a fase B próxima à torre zero, a partir das quais a energia de 125kJ é excedida nos pára-raios fase B das torres estudadas.

TABELA 11 - CORRENTES LIMITES (kA) PARA ATINGIR ENERGIA 125 kJ RESISTÊNCIA 300 Ω

TORRE	IMPEDÂNCIAS DE PÉ DE TORRE (OHMS)			
	30	300	2000/2000	2000/300
0	52	54	39	63.5
1	108	> 150	> 150	144
2	> 150	> 150	> 150	> 150

Observa-se que, para condição de 300 Ω , pode ocorrer falha do pára-raios a partir de 54kA, corrente com alta probabilidade de ser excedida (aproximadamente 30%).

Para a condição da queda de descarga na torre, por ser mais crítica em relação às energias envolvidas, é de se esperar que esse valor de corrente seja menor ainda. Não foram consideradas representativas correntes de descargas maiores que 150kA por possuírem probabilidade praticamente zero de ocorrer.

A partir dessa análise, considerou-se como restritiva a utilização de pára-raios com esse nível de energia para essa LT, caso contrário haveria risco significativo de falha do equipamento. Partiu-se, então, para se utilizar

a energia de 171kJ como referência nas avaliações seguintes. A Tabela 12 apresenta a amplitude das correntes, considerando uma descarga com e sem subsequente, para se ter esse nível de dissipação nos pára-raios, para o caso padrão de 300Ω e queda da descarga na fase B.

TABELA 12 - CORRENTES LIMITES PARA ATINGIR ENERGIA 171 kJ RESISTÊNCIA 300 Ω

STROKES	CORRENTE ΦB(kA)
1 SEM SUBSEQUENTE	70
1 COM 1 SUBSEQUENTE	58 / 17.4*

*NOTA.: Forma de onda da corrente subsequente = 2,6/19 μs

Para que uma descarga sem subsequentes dê origem a uma energia de 171kJ, utilizada como referência, a amplitude da corrente encontrada foi de 70kA, correspondendo a uma probabilidade de aproximadamente 15% de ser excedida.. A corrente de 58kA, relativa às descargas com subsequentes, tem uma probabilidade de 28% de ser excedida (3).

4.2.2 Trecho com cabo pára-raios:

No trecho com cabo pára-raios as simulações não apresentaram restrições sob o ponto de vista das capacidades de absorção de energia consideradas nesse estudo.

4.2.3 Estimativa do desempenho da LT

Nas estimativas do desempenho da LT frente as descargas atmosféricas foi utilizado o programa de computador FLASH. Para o trecho sem cabo pára-raios, onde está prevista a instalação de pára-raios de ZnO em todas as estruturas e em todas as fases, foi estimada a falha dos pára-raios, tendo em vista os valores máximos de corrente da descarga atmosférica suportados pelos pára-raios (Tabela 10). Nesses cálculos, levou-se em conta o número de descargas que atingem a LT por ano e as seguintes probabilidades:

- das intensidades de corrente das descargas mostradas na Tabela 10 serem excedidas;
- de ocorrência de descargas múltiplas;
- da descarga atingir a torre ou o meio do vão.

Desses cálculos, chegou-se à conclusão de que o número anual de falhas dos pára-raios será inferior a 4.

5.0 OBSERVAÇÕES E CONCLUSÕES

O objetivo da CEMIG com a instalação de pára-raios de LTs é melhorar o desempenho do suprimento de energia elétrica, oferecendo mais qualidade aos seus

consumidores. A experiência operativa até então tem se mostrado satisfatória, tendo como consequência uma melhoria significativa do desempenho das linhas nas quais essa solução foi aplicada. Com relação ao desempenho dos pára-raios, não foi reportada nenhuma queima dos equipamentos já instalados. Não obstante, as instalações com pára-raios de LTs vêm sendo ainda assumidas como experimentais e o monitoramento permitirá obter mais experiência no assunto, possibilitando uma aplicação otimizada desse equipamento no futuro.

Com relação ao dimensionamento dos pára-raios, observa-se a necessidade de uma discussão ampla com o objetivo de se avaliar os testes de suportabilidade de energia, até então adotados nas normas de pára-raios ZnO, para essa nova aplicação desses equipamentos. Os impulsos de correntes adotados nessas normas podem não retratar, nem em amplitude nem em duração, os que ocorrem na prática.

A solicitação energética aos pára-raios é função das características específicas de cada LT. Dessa forma, o dimensionamento da capacidade térmica necessária aos pára raios, bem como a real definição da suportabilidade dos mesmos, são de grande importância, uma vez que esses fatores estão diretamente ligados aos custos dos equipamentos que são, normalmente, em grande número para essa aplicação.

Além disso, um maior conhecimento da distribuição estatística das descargas atmosféricas, do comportamento do sistema de aterramento frente a transitórios e a concepção de modelos eletrogeométricos mais precisos, irão contribuir para um emprego cada vez mais efetivo da aplicação de pára-raios na melhoria do desempenho LTs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - Aplicação de Pára-raios de ZnO em cadeias de isoladores da Linha de Transmissão 138 kV Mariana - Ouro Preto 2.
- (2) CHERCHIGLIA, L.C.L. et alli - Utilização de Pára-raios de ZnO em Linhas de Transmissão - VIII ERLAC - 1999
- (3) CARVALHO, A.M.; TRIGINELLI, W.A.C; DINIZ, J.H.; CHERCHIGLIA, L.C.L. - Pesquisas de Descargas Atmosféricas em Minas Gerais - Principais Parâmetros Aplicáveis à Engenharia - XIII SNPTEE - 1995